气候变化和土地利用覆盖变化对河西地区植被净初级生产力的影响

刘一丹[1]， 姚晓军[1]， 李宗省[1,2]， 胡家瑜[1]

（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院，高寒山区同位素生态水文与国家公园观测研究站，甘肃省祁连山生态环境研究中心，干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘 要：河西地区不仅是我国重要的生态安全保护优先区，而且是丝绸之路经济带核心地段，开展该地区植被净初级生产力（NPP）评估及驱动力定量分析对于陆地生态系统与大气碳交换、气候变化与人类活动对植被综合作用等研究具有重要的理论价值和现实意义。基于MOD17A3产品数据、土地利用覆盖数据和气象数据，采用R-贡献率和偏相关分析方法，分析了2000—2020年河西地区植被NPP变化特征及土地利用覆被和气候变化对NPP的影响，结果表明：(1) 河西地区耕地、水域和居民建筑用地面积整体呈增加趋势，而草地和未利用土地面积有所减少，且2010年后的土地利用覆盖变化（LUCC）整体动态度显著提高，其中，草地、耕地、建设用地和未利用地主导了土地利用类型的相互转换。(2) 河西地区整体植被NPP呈增长趋势，2000—2010年和2010—2020年的变化斜率分别为0.86和1.29，且植被NPP具有明显的区域异质性，由东南向西北递减。(3) 2000—2020年河西地区LUCC对植被NPP的影响逐渐增大，且气候变化对植被NPP的贡献率普遍高于LUCC，但二者对不同土地利用覆盖类型所起的作用不同，表现为耕地、林地和草地的植被NPP影响因子以气候变化为主导，未利用土地和居民建筑用地的植被NPP影响因子逐步以LUCC为主导。

关键词：净初级生产力；土地利用；时空变化；驱动因素；河西地区

净初级生产力（Net Primary Production，NPP）表示植被所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分，反映了植被固定大气中CO_2能力的表征[1-2]，也是陆地生态系统响应全球变化的关键因素[3-5]。其可以用来衡量生态系统的稳定性和可持续性[6-7]，并影响和平衡生物群落的数量和质量。NPP的时空发展和推动因素一直受到广泛关注，许多学者从不同角度深入探索，李飞等[8]就曾利用周广胜等[9]的综合模型和211个气象站的观测数据，准确地预计西北地区的NPP水平；而王景升等[10]则利用藏北地区的草地第一生产力的发展趋势和空间布局，深入探讨了这一领域的发展规律。在NPP影响因子方面学者们大多选择气温、降水等气候因素，除气候要素外，地形特征、土壤类型、土地利用覆盖变化（Land Use Cover Change，LUCC）和人类活动也直接或间接地对NPP产生影响，其中土地利用变化对NPP的影响已成为当前碳循环研究的重要组成部分[11-13]，关系到区域生态系统质量及其稳定性，如赵晓等[14]研究了土地利用变化对三峡库区重庆段植被NPP的影响，表明土地利用类型变化影响植被固碳能力和NPP空间分布；彭月月等[15]分析了土地利用变化对成都市植被NPP的影响，表明建设用地面积比例变化显著影响区域植被NPP。以往研究大多只关注不同土地利用类型作用于人类经济发展方面的影响，而基于土地利用类型转移在植被绿化、生态恢复方面的关注则相对较少[16]。

近年来，河西地区作为西部生态安全屏障的主要组成部分[17]，也成为丝绸之路经济带的主要节点，在NPP方面的研究已取得重要进展，但由于过去的整体线性回归法[18]未能充分考虑NPP的局部

收稿日期：2023-08-16； **修订日期**：2023-11-10
基金项目：国家自然科学基金（42071089）
作者简介：刘一丹（2001-），女，硕士研究生，主要从事干旱区植被生态研究. E-mail: ylnorth@foxmail.com
通讯作者：姚晓军. E-mail: xj_yao@nwnu.edu.cn

性特征,也未能充分考虑NPP与气候因素的共线性,从而使得研究的准确性受到影响,存在较高的不确定性。研究表明,气候变化的各种成分以及LUCC的存在,都会显著地改善当地的NPP水平。本文的主要研究目标是:(1)明确河西地区植被NPP与土地利用/覆盖(Land Use Land Cover,LULC)的时空演变特征;(2)定量评价植被NPP与LUCC、气候等因子之间的响应关系。研究结果不仅有助于掌握河西地区的生态系统质量和自然生产能力,而且可为协调该地区经济发展和环境保护提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

根据《甘肃省黄河流域生态保护和修复专项实施方案》,河西地区(36°46′~42°49′N,92°44′~104°14′E)位于黄河中上游,是与青藏高原东北端相接的狭长状区域。东起甘宁交界,西至甘新交界,南部与青海省相接并延伸至黄河干流以西,北至内蒙古自治区和蒙古国(图1),其特殊的自然环境条件,使之成为一个具有重要生态意义的保护区,也为黄河生态系统的修复提供了重要的支持[19]。东西长约1200 km,南北宽约50 km以上,总面积27.81×10^4 km^2,包含祁连山水源涵养能力提升区、黄河重要支流水源涵养能力提升区、北部防沙带防风固沙能力提升区、黄河流域矿山生态环境综合治理区和呈散状分布的甘肃省黄河流域生物多样性保护区在内的5个黄河流域生态系统重点实施区[20-21]。河西地区的地理特征是西边较宽,东边较狭,而且昼夜温度变化较快[22],祁连山脉位于其西边,而河西的其他山脉则位于其中,这里的水资源极其稀缺且蒸发量极大,祁连山的冰雪融水从东至西流淌,形成了石羊河、黑河和疏勒河三大河流,为当地居民的日常生活和绿洲农业的发展提供了丰富的淡水资源。由于特殊的地理位置和脆弱的生态环境,河西地区是我国重要的生态安全保护优先区,也是国家"三区四带"和甘肃省"四屏一廊"至关重要的组成部分[22]。

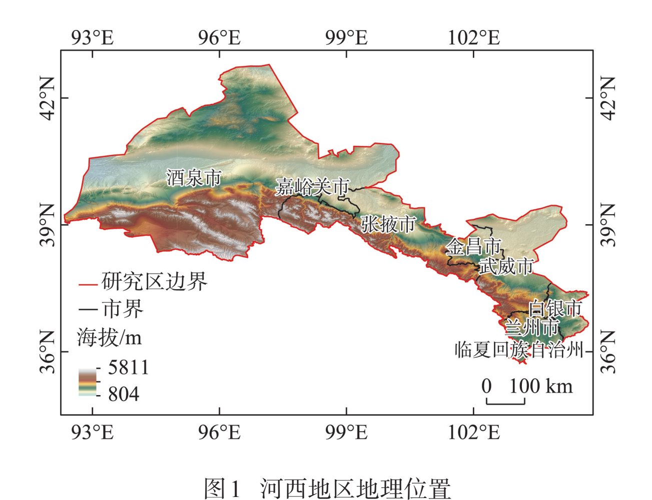


图1 河西地区地理位置

Fig. 1 Geographical location map of the Hexi Region

1.2 数据来源和预处理

1.2.1 植被NPP数据 本研究选用美国宇航局(NASA)的Terra MODIS NPP数据集中的MOD17A3 HGF V6(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)。该数据集的空间分辨率高达500 m,且时间分辨率也达到了1 a。通过结合BIOME-BGC模型、光能利用率模型以及其他相关技术,可以准确预测出NPP,这一成果可以为世界各个地区的植被生长、生物量评价以及环境变迁提供有力的支持,并且正受益于各种领域的深入探索[24-26]。通过使用NASA官方的MRT软件以及Python编程语言,对河西地区的NPP数据进行了多种预处理,包括拼接、裁剪、重投影以及去除了异常值(即数据集有效值为-3000~32700),从而获取了有效的河西地区逐年NPP数据。

1.2.2 土地利用覆盖(LULC)数据 选用中国国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)提供的中国土地利用现状遥感监测数据集,该数据集拥有完整的中国土地利用现状遥感监测系统,其由国家科技支撑计划、中国科学院知识创新工程重要方向项目以及其他一系列科研项目共同支持,涵盖了中国各个省份,拥有完整的、跨越不同季节的土地利用信息。基于Landsat TM/ETM+遥感影像,经由专业的技术手段,将其转换为1 km的空间分辨率,从而形成一套具有极强准确性的土地利用遥感监测系统,其中涵盖了6个一级类型,25个二级类型,可满足不同领域的需求,并在这项研究中经过筛选最终确定出2000年、2010年和2020年3期的土地利用情况。

1.2.3 气象数据及其他数据 本研究使用了中国国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)提供的中国逐月平均温度数据集和逐月降水量数据集(2000—2020年),空间分辨率为1 km。这个数据集由英国气候研究中心(CRU)和世界气象组织

(WorldClim)提供的高精度气候和天气信息组成,其使用了Delta空间降尺法来收集中国地区的气候信息。本研究还利用了美国地质调查局网站(/https://earthexplorer.usgs.gov/)提供的数字高程模型(DEM),空间分辨率为1弧秒(约30 m),以更加准确地反映地质构造的特征。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用/覆盖变化分析

(1)动态度

通过测量不同的土地利用/覆盖情况,可以获得有关该区域土地利用的多个重要参数[27],其中,单一土地利用的动态度可以衡量该区域不同类别的土地利用情况,而综合土地利用的动态度则可以更好的揭示该区域的发展趋势,从而更好的把握该区域的发展规律,并且可以更准确的预测未来的发展趋势。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{1}$$

式中:K代表在一定时期里,单一土地利用情况的变化程度;U_a指初期该土地利用类型的总面积;U_b指末期该土地利用类型的总面积;T代表特定的时间段;K体现了该时期内单一的土地利用类型的总面积变化率。

$$LC = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta LU_{i-j}}{2\sum_{i=1}^{n} LU_i} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{2}$$

式中:LC表示研究区内土地利用情况的总体趋势;LU_i表示第i类土地利用的区域总面积;ΔLU_{i-j}表示第i类土地利用转化为第j类土地利用的面积绝对值;T表示特定的时间段,如果以年计算,那么LC的值代表这个特定研究期内综合土地利用情况的年变化率。

(2)R-贡献度

R-贡献度方法由Hicke等[28]提出,用于计算LUCC和气候变化对不同LULC类型总NPP的影响量和贡献率[29]。如果S_i、S_j、NPP_i、NPP_j分别表示时间t_i、t_j的不同LULC类型的面积和其单位面积NPP,则不同LULC类型的总NPP变化量(ΔNPP_T)可表示为:

$$\Delta NPP_T = NPP_j \times S_j - NPP_i \times S_i \tag{3}$$

设$\Delta S = S_j - S_i$,$\Delta NPP = NPP_j - NPP_i$,则上式可变为:

$$\begin{aligned}\Delta NPP_T &= \left(NPP_i + \Delta NPP\right) \times \left(S_i + \Delta S\right) - NPP_i \times S_i \\ &= \Delta NPP \times S_i + \Delta S \times NPP_i + \Delta S \times \Delta NPP\end{aligned} \tag{4}$$

式中:$\Delta NPP \times S_i$为气候变化对该土地利用类型总NPP的影响量;$\Delta S \times NPP_i$为LUCC对该土地利用类型总NPP的影响量;$\Delta S \times \Delta NPP$分量则是二者对该土地利用类型总NPP的共同作用。若不考虑二者的共同作用,下列方程列出了气候变量(公式5)和LUCC(公式6)对总NPP(R_C,R_L)的贡献率。

$$R_C = \frac{\left|\Delta NPP \times S_i\right|}{\left|\Delta NPP \times S_i\right| + \left|\Delta S \times NPP_i\right| + \left|\Delta NPP \times \Delta S\right|} \times 100\% \tag{5}$$

$$R_L = \frac{\left|\Delta S \times NPP_i\right|}{\left|\Delta NPP \times S_i\right| + \left|\Delta S \times NPP_i\right| + \left|\Delta NPP \times \Delta S\right|} \times 100\% \tag{6}$$

式中:ΔS和ΔNPP分别是LULC和NPP在一个周期内变化的面积变化。

1.3.2 Sen's Slope、Mann-Kendall趋势检验和偏相关分析 分别采用Mann-Kendall统计检验法和Sen's Slope分析法进行趋势检验,采用偏相关分析(Partial Correlations Analysis)探索两两变量间的相关程度,各方法描述详见文献[30-31]。

2 结果与分析

2.1 河西地区植被NPP时空分布特征及变化趋势

2000—2020年河西地区植被NPP的年际变化总体呈上升趋势,且增长率持续提高(图2)。2000—2010年河西地区年平均NPP值大部分保持在55.74~61.06 g C·m^{-2}·a^{-1},多年平均值为49.27 g C·m^{-2}·a^{-1},而最低值(43.01 g C·m^{-2}·a^{-1})则是在2001年出现。在2010—2020年河西地区植被NPP显著增

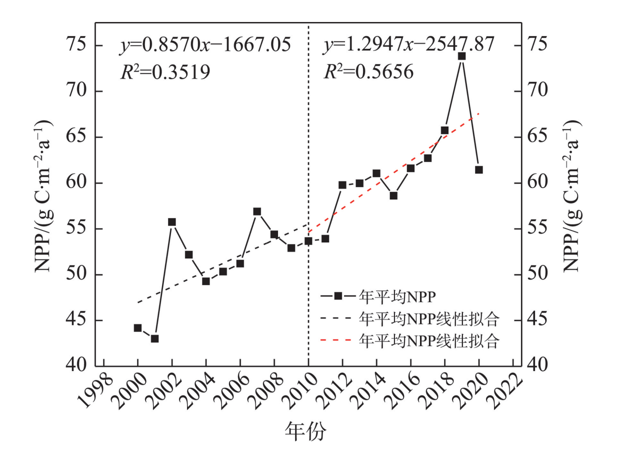


图2 2000—2020年河西地区年均NPP变化

Fig. 2 Trends in NPP in Hexi Region from 2000 to 2020

加，多年平均值为61.63 g C·m^{-2}·a^{-1}，相较于前10 a整体植被NPP增长幅度显著，其中2019年的植被NPP为研究时段内最高值（73.85 g C·m^{-2}·a^{-1}），这表明河西地区的植被NPP总体上正在朝着良好的方向发展。

2000—2020年河西地区年均NPP空间分布差异显著，总体表现为由东南向西北递减趋势（图3）。年均NPP大部分处于低于100 g C·m^{-2}·a^{-1}的状态，分布于西部和北部区域，高于100 g C·m^{-2}·a^{-1}的年均NPP主要位于中部和南部区域，呈扩散状由高值向低值区域延伸。结合表1可知，河西地区年均NPP<100 g C·m^{-2}·a^{-1}的面积占比高达76.53%，主要分布在嘉峪关以西以及巴丹吉林和腾格里两大沙漠南缘的大片区域；年均NPP介于100~200 g C·m^{-2}·a^{-1}的面积占比为12.36%，分布于酒泉市少部分地区和陇西黄土高原的西部区域；年均NPP介于200~400 g C·m^{-2}·a^{-1}的面积占比为5.91%，集中于祁连山脉北部地区；年均NPP高于400 g C·m^{-2}·a^{-1}的面积占比最小，仅1.24%，主要分布在黄河流域。

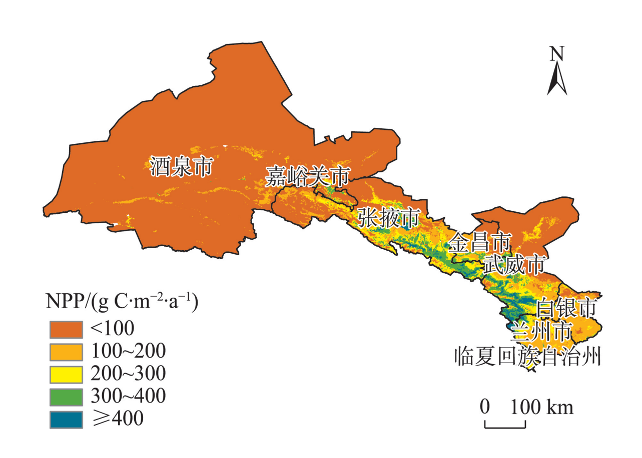


图3 2000—2020年河西地区平均植被NPP空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation NPP in Hexi Region from 2000 to 2020

从市（州）级行政区划来看，临夏回族自治州的年均NPP数值最高（232.59 g C·m^{-2}·a^{-1}），其原因是该地区植被NPP<100 g C·m^{-2}·a^{-1}的占比极少，植被NPP基本处于200~300 g C·m^{-2}·a^{-1}，整体的植被NPP良好，然而由于临夏回族自治州的土地利用面积较小，使得其年植被NPP偏低。酒泉市的年均NPP数值最低（7.07 g C·m^{-2}·a^{-1}），96.77%的植被NPP面积占比处在低于100 g C·m^{-2}·a^{-1}的状态，这一现象是由于酒泉市的荒草地、沙地、裸土地等土地利用类型占比偏多造成。其余各市的年均NPP的数值统一处于较好状态，受林地面积的影响，武威市和兰州市部分地区的植被NPP≥400 g C·m^{-2}·a^{-1}的占比相较于其他市（州）较高（表1）。

与年均NPP类似，河西地区NPP变化趋势在空间上亦存在很大差异，主要变化集中于东南地区（图4）。具体而言，2000—2010年河西地区大部分区域（88.70%）NPP呈稳定不变状态，并以NPP<100 g C·m^{-2}·a^{-1}的区域为主；NPP呈增长趋势的区域主要位于中部地区，占研究区总面积的9.36%；NPP呈降低趋势的面积主要分布于武威市南部地区（1.94%）。2010—2020年河西地区呈增长趋势的面积扩大至东南部，其面积占比上涨到13.43%，NPP呈降低趋势的面积显著减小，相较于前10 a的占比下降2.47%，零星分布于武威市、白银市及兰州市部分地区。

2.2 河西地区气候变化对植被NPP的影响分析

在中国的干旱半干旱地区，气温与降水对改善

表1 2000—2020年河西地区各市（州）NPP统计

Tab. 1 NPP statistics by city (state) in Hexi Region from 2000 to 2020

市（州）	不同等级年均NPP占比/%					年均NPP /(g C·m^{-2}·a^{-1})	年NPP /(10^6 g C·m^{-2}·a^{-1})
	<100	100~200	200~300	300~400	≥400		
兰州*	2.80	65.82	20.75	5.36	5.27	200.83	54.85
白银*	15.02	75.05	7.11	2.57	0.25	135.18	32.94
临夏	1.07	23.20	67.68	6.31	1.75	232.59	8.59
武威	53.68	16.21	12.76	11.75	5.60	123.42	123.96
金昌	42.05	34.34	13.55	9.91	0.15	125.61	29.81
张掖	43.23	23.95	17.47	12.72	2.63	143.98	173.43
酒泉	96.77	2.49	0.50	0.24	0.00	7.07	37.84
嘉峪关	92.18	3.91	2.69	1.22	0.00	15.43	0.60
合计	76.53	12.36	5.91	3.96	1.24	984.11	462.02

注：兰州*指兰州市部分地区，包括红古区、永登县和皋兰县；白银*指白银市部分地区，包括白银区、平川区和景泰县。

当地的NPP有着至关重要的作用[32]。通过研究河西地区NPP与该区域气温和降水之间的相关性,发现2000—2010年河西地区的降水量与NPP的相关性明显强于气温的相关性,2010—2020年气温和降水对NPP的影响相关值分别从0.1682和0.8184变化到0.0083和0.0788,相对于前10 a气候因子与植被NPP的相关性略微降低(图5)。总体上看,2000—2020年河西地区植被NPP与降水的相关性

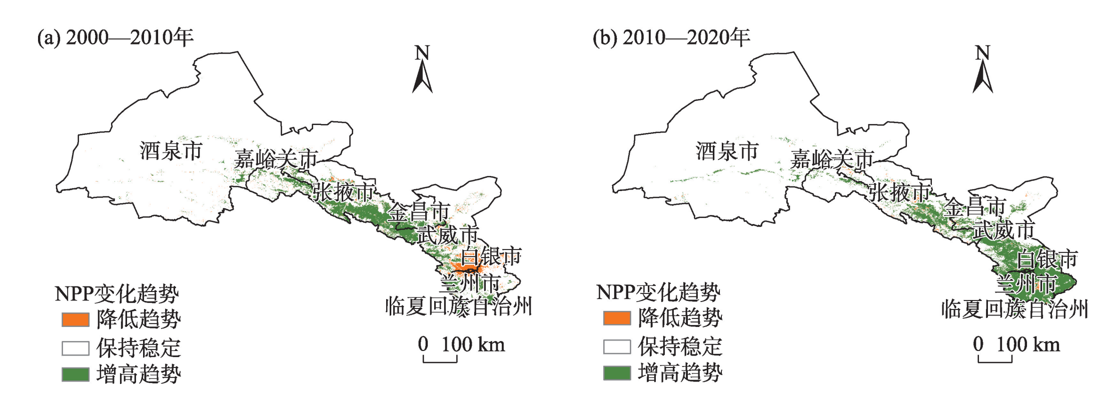


图4 河西地区植被净初级生产力变化趋势

Fig. 4 Variation trend of vegetation NPP in Hexi Region

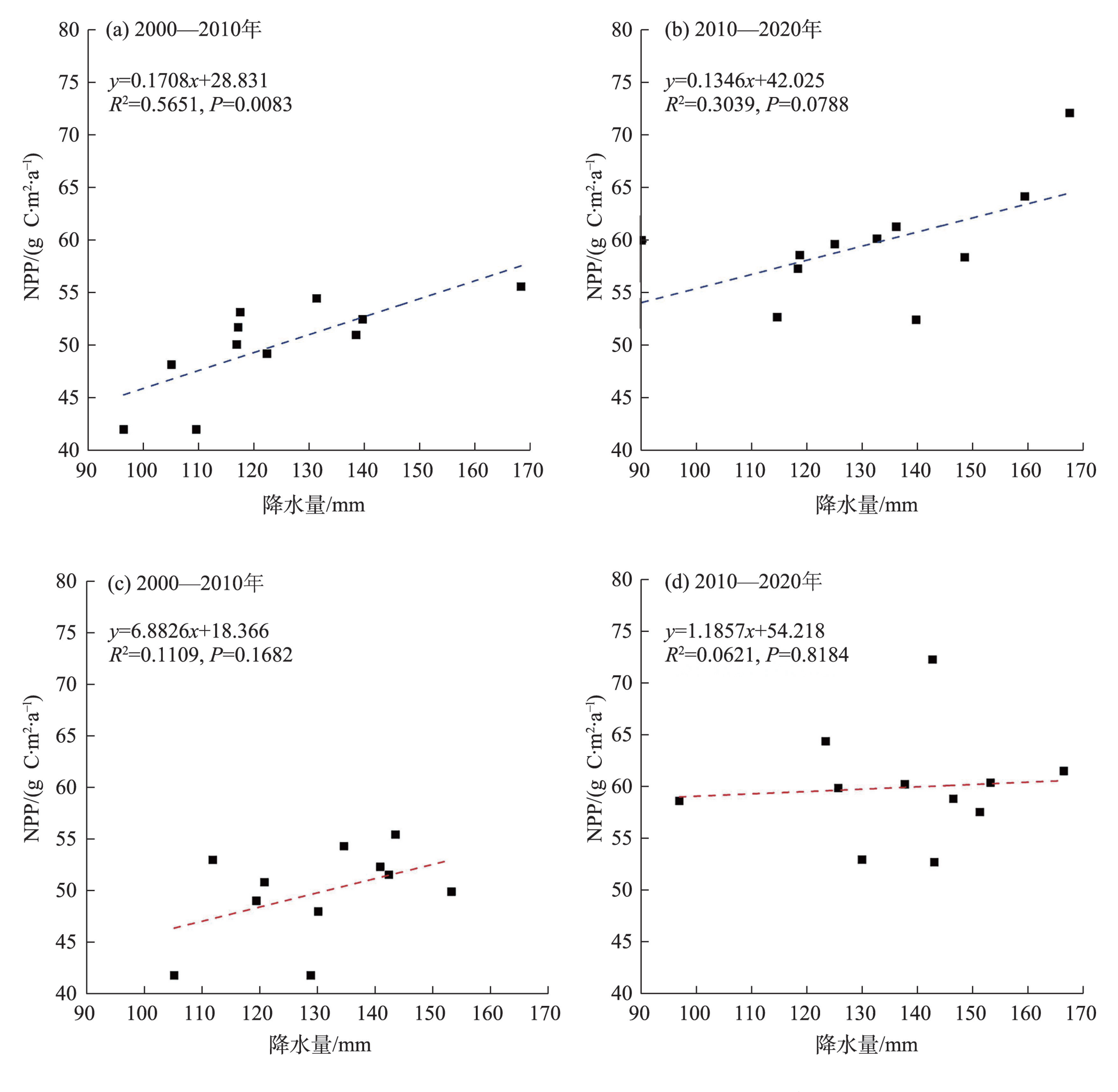


图5 2000—2020年河西地区植被净初级生产力、气温和降水散点图

Fig. 5 Scatter plot of vegetation NPP, temperature, and precipitation in Hexi Region from 2000 to 2020

比气温更显著，当土壤中的水分流失时，植被蒸腾作用增强，气候变暖会加剧这种变化，进一步抑制植物的生长和光合作用，影响植物净光合作用所固定的有机物质总量[33-35]。

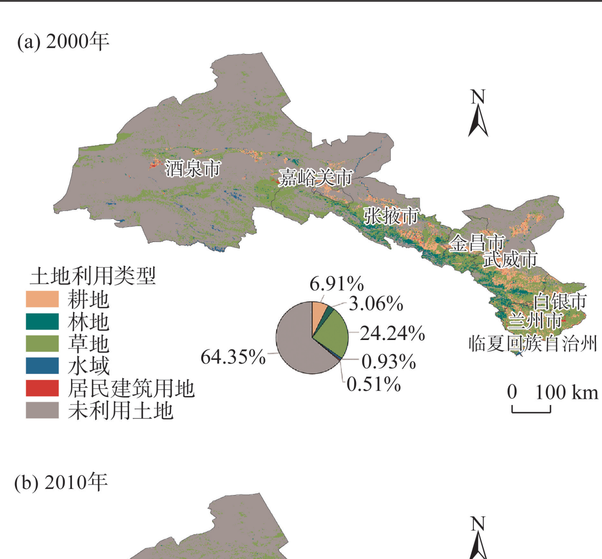
2.3 河西地区土地利用/土地覆盖时空演变及变化趋势

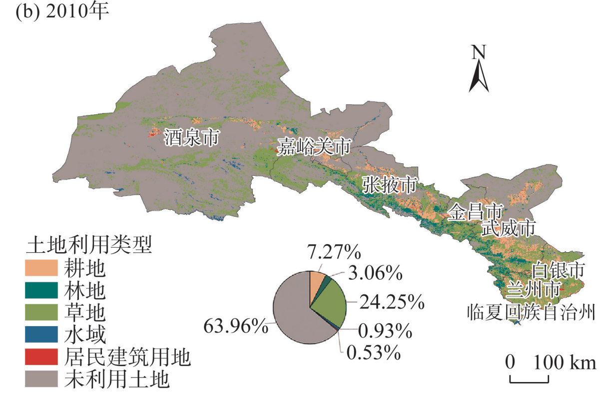
河西地区的东南部主要以草地为主，耕地和林地分布稀疏；中部地区耕地分布较为集中；西北部以未利用土地为主，部分地区零散分布有草地。林地和水域数量较少，林地主要集中分布于武威市，水域主要分布于酒泉市。居民建筑用地面积最小，在河西地区内零星分布。河西地区的土地利用类型主要为未利用地、草地和耕地，其中，大部分区域为未利用土地，主要包括荒草地、盐碱地、沼泽地、沙地、裸土地、裸岩等，在研究时段内面积持续减少，特别是2000—2010年未利用土地的面积占比降低了0.39%。草地分布面积较为广泛，2000—2010年面积出现减少现象，而耕地面积的增长率提升，耕地面积占比上涨了0.37%。2010—2020年草地和耕地的面积呈略微增长现象，同时居民建筑用地的面积占比相较于2000—2010年较为明显的提高了0.18%（图6）。

2000—2010年由于开垦荒地、防风固沙、城市扩张等人类活动，未利用土地面积共减少了1687.76 km^2。耕地面积的增长总量最多（1326.89 km^2），居民建筑用地面积增长了562.12 km^2，且增速最快达到了3.41%。另外，耕地面积在2000—2010年增加了1022.93 km^2，增长率为0.49%，2010年后面积增速放缓，增长率下降至0.14%，这可能与部分生态保护区退耕还林有关。河西地区耕地、林地、草地、水域、居民建筑用地和未利用土地的相互变化代表了该地区的LULC转移情况（图7）。在2000—2020年不同土地利用类型的转出总量为3314.93 km^2，其中，未利用土地的面积转出量最大。2000—2010年以耕地和草地为主导，转移为耕地的面积最多达到720.15 km^2，2010—2020年转移主要是由耕地和居民建筑用地引起，居民建筑用地的面积转移从35.74 km^{2}快速增长到231.92 km^2。耕地面积的转出量由181.80 km^{2}上升到255.68 km^2，大部分面积转化为草地，归因于退耕还林还草工程的实施。

2.4 河西地区土地利用变化对植被净初级生产力的影响分析

人类活动造成的土地利用变化容易导致植被





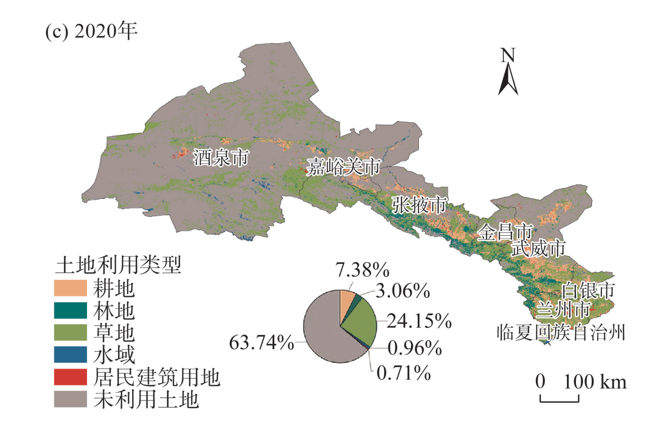


图6 2000年、2010年、2020年河西地区土地利用类型的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of LULC types in Hexi Region in 2000, 2010 and 2020

类型、结构和区域配置状况发生改变，其影响主要来源于土地利用变化过程及其用地功能转变[36]。2000—2010年所有土地利用类型年均NPP均有所增加，其中林地的NPP最高且增长量最为显著[37]。自2010年以来，居民建筑用地的年均NPP显著下降，而其他土地利用类型的年均NPP却在不断增长，这可能是由于流域治理工程的有效实施，例如黑河流域的生态调水工程和石羊河流域的环境治

理工程,其不仅确保了下游区域的生态用水,而且还使得植被得以恢复[38-41](表2)。

LUCC的变化对各种植物的净初级生产力造成了重大影响,这主要是由于草地和森林的面积比其他地方更大,而且2010—2020年耕地面积的增长比2000—2010年明显减少。2000—2020年河西地区年均NPP≥400 g C·m^{-2}·a^{-1}的面积明显增加,其占比从0.34%提升到1.98%,集中分布于河西地区的南部,这体现出张掖市湿地保护与修复、金昌市积极推进国土绿化和防沙治沙、武威市加大水土流失综合治理等政府生态环境保护政策的落实成效。河西地区年均NPP介于200~400 g C·m^{-2}·a^{-1}之间的面积也呈现出显著的扩张趋势,其面积占比提升了4.64%,以及西部地区平均植被NPP<400 g C·m^{-2}·a^{-1}的面积出现大幅度下降,面积占比从82.20%减少至75.91%,表明酒泉市实施植被恢复、湿地保护、防沙治沙等重点生态项目取得有效成果。

3 讨 论

3.1 气候因子对河西地区植被NPP变化影响

气温和降水是影响植被NPP变化的两个重要因素。根据IPCC第五次研究报告,气候变化与碳循环存在显著的正相关性,但这种关系随区域变化而变[42]。河西地区气候类型与植被种类复杂多样,使得气温与降水对植被NPP的影响在数值和面积上并不一致(图8)。

2000—2010年植被NPP与气温呈正相关和负相关的占比分别为85.44%和14.56%,呈正相关的区域主要集中在河西地区的中部,包括黑河和疏勒河中下游区域;而负相关的区域则位于东南部地区。NPP与降水呈正相关的面积占比为96.07%,其相关性最强的区域集中在张掖市、白银市和武威市;而呈负相关的区域只占3.93%。气温降低是地表植被的胁迫因子,而干旱区气温降低可以减少蒸散发

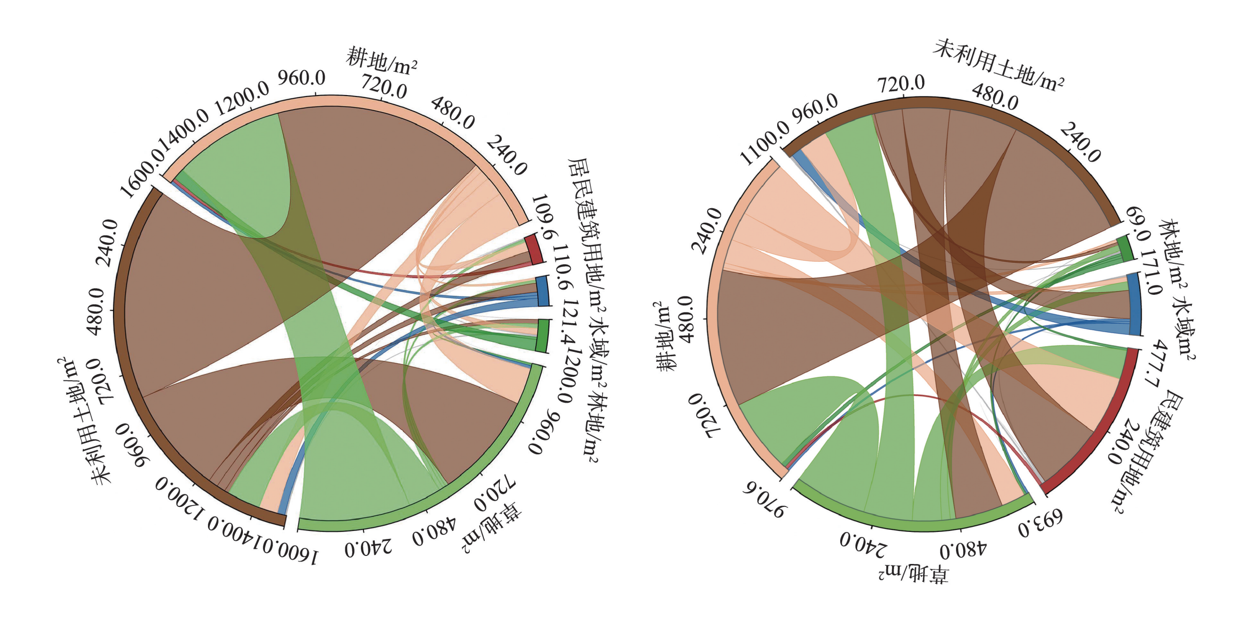


图7　2000—2020年河西地区土地利用/覆盖变化和弦图

Fig. 7　LUCC in Hexi Region from 2000 to 2020 in a chord diagram

表2　不同时期土地利用类型的年平均净初级生产力

Tab. 2 Annual average NPP by LULC types at different time periods

年份	不同土地利用类型年平均净初级生产力/(g C·m^{-2}·a^{-1})					
	耕地	林地	草地	水域	居民建筑用地	未利用土地
2000年	166.60	228.88	72.27	53.66	134.94	7.56
2010年	195.93	280.28	90.83	69.93	157.97	9.72
2020年	228.72	298.92	105.57	78.13	156.05	10.57
平均	197.08	269.36	89.56	67.24	149.65	9.28

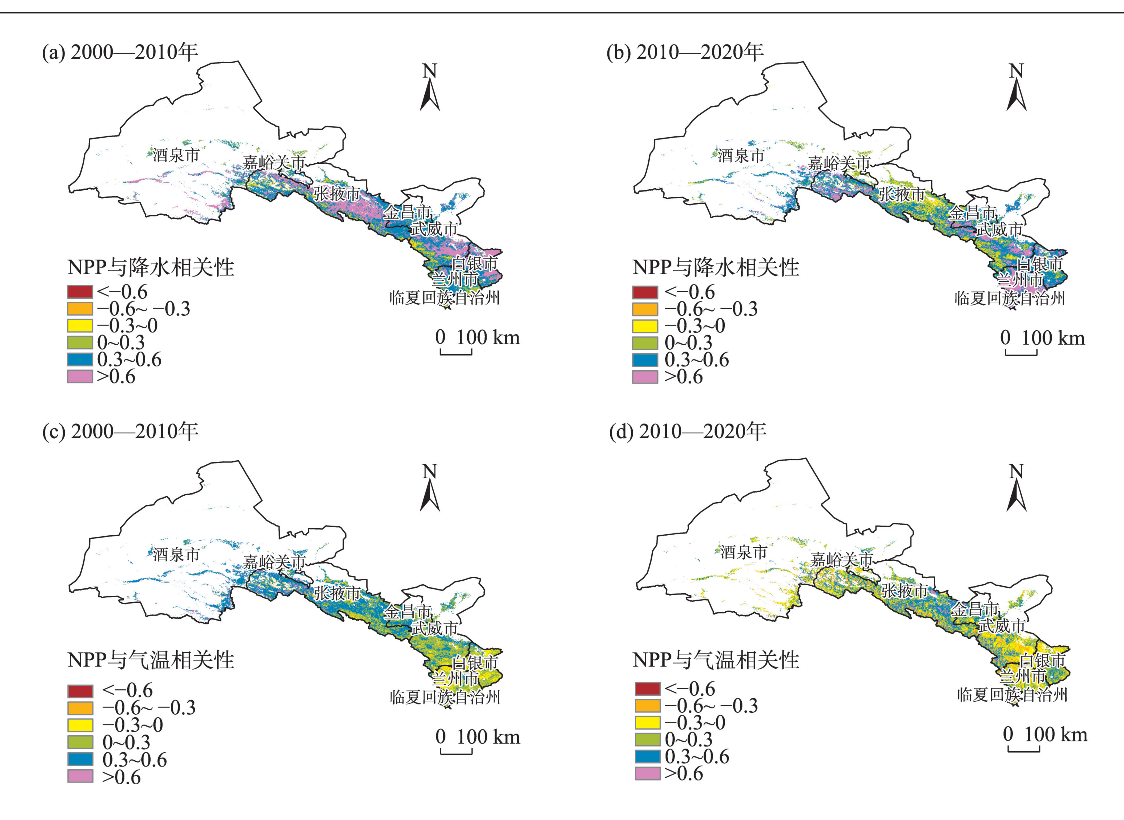


图8　2000—2020年河西地区植被净初级生产力与降水(a、b)和温度(c、d)的相关性

Fig. 8　Partial correlation analysis between vegetation NPP and precipitation (a, b) and temperature (c, d) in Hexi Region from 2000 to 2020

量,减缓水分流失,同时可以增加光合利用率,有利于植物生物量的积累。2010—2020年植被NPP与气温正相关和负相关各占66.78%和33.22%,其中正相关的区域比2000—2010年有所减少,主要分布在祁连山区,而负相关的区域则集中在武威市的一些地区。河西地区的NPP与降水之间存在着明显的正相关关系,主要位于中部和东南部地区,其中兰州市部分地区的相关性明显增强。降水对刺激植被NPP的后期生长起到了显著的作用,1981—2015年石羊河流域降水增多,缓解了偏低气温对植被生长的限制。为了保证植物的健康,必须提供适量的降雨,同时避免由于过热的天气造成的NPP损失。通过开展祁连山的人工增雨雪工程,不仅可以大幅度改善黄河流域的气候,而且还可以有效地改善当地的生态环境,促进森林和草原的生长和发育。

3.2　不同土地利用类型的植被净初级生产力影响因子

2000—2020年LUCC对各土地利用类型的植被NPP影响力普遍小于气候变化,这主要是由于植被的生理特质引起,但也不难看出LUCC同样对植被NPP起到一定的影响。在2000—2010年耕地LUCC贡献率相较2010—2020年增高,映射其同期面积的显著增加,而在2010—2020年的居民建筑用地LUCC贡献率明显上涨,与其LUCC动态度的提升相呼应。各种土地利用类型的LUCC贡献率相较于2000—2010年都有所提升,尤其是草地和住宅区的利用率都有明显的增长(表3)。这主要得益于政府采取的湿地保护、森林管理、草原放牧等措施,这些措施有助于植物的恢复和生长,并产生了积极的生态效益。

结果表明,耕地虽然前10 a受LUCC的影响作用,但由于其植被对气候变化的生理特性更为显著,因此其植被NPP影响因子以气候变化为主导。干旱半干旱区的植被对降水与气温的变化更为敏感,所以林地和草地气候变化的贡献率明显高于LUCC,其植被NPP影响因子以气候变化为主导。由于近几十年人类活动对流域的保护治理、荒漠地区的改善利用以及城市的发展扩展[43],未利用土地和居民建筑用地的植被NPP影响因子逐渐以LUCC为主导。

针对LUCC对NPP总量增长的影响效应,退耕还林、水源保护、植树造林等系列生态与环境保护

表3 不同土地利用类型对2000—2020年总植被净初级生产力的影响量和贡献率

Tab. 3 Influence and contribution of different LULC types to the total NPP from 2000 to 2020

土地利用类型	影响因素	2000—2010年		2010—2020年	
		影响量/(Tg C)	贡献率/%	影响量/(Tg C)	贡献率/%
耕地	气候变化	56.39	73.78	66.42	90.49
	LUCC	17.04	22.28	5.98	8.15
林地	气候变化	43.82	99.68	15.89	98.69
	LUCC	−0.11	0.26	−0.19	1.24
草地	气候变化	125.26	99.85	99.55	96.97
	LUCC	0.15	0.12	−2.59	2.69
水域	气候变化	4.23	97.70	2.12	76.21
	LUCC	−0.07	1.80	0.59	21.28
居民建筑用地	气候变化	3.24	77.06	−0.28	3.73
	LUCC	−0.28	6.69	7.91	95.24
未利用土地	气候变化	38.64	97.26	15.20	95.84
	LUCC	−0.83	2.19	−0.58	3.99

工程增进了河西大部分区域植被覆盖度的提高,进一步突出了植被的固碳释氧生态功能;而随经济影响的快速城镇化使部分区域植被覆盖度有所降低,固碳效益降低。对此,建议在今后的生态建设与环境保护工程中,政府部门应在区域资源配置规划过程中协调土地利用类型的比例,以维持区域植被净初级生产力的稳定,促进区域生态环境保护工作。重点加强新一轮退耕还林工程的建设,积极巩固已取得的成果,全面贯彻落实国家生态环境政策,不断提升环境保护水平,同时,积极推动城镇化的发展,加强城市绿地建设,营造宜人的城市环境。

4 结 论

本文利用MOD17A3产品数据、土地利用覆盖数据和气象数据,分析2000—2020年河西地区的植被净初级生产力的时空分布特征与动态变化规律,并探讨植被NPP对气候、LUCC等因素的响应,主要结论如下:

(1) 2000—2020年河西地区植被NPP年均值整体呈东南向西北逐渐减弱的趋势,总体呈波动上升变化且后10 a的增幅相较于前10 a显著增加,年平均值为49.27 g C·m^{-2}·a^{-1},年际变化较大,其中2001年NPP值占比最低(43.01 g C·m^{-2}·a^{-1}),2019年占比最高(73.85 g C·m^{-2}·a^{-1})。

(2) 在2000—2020年河西地区的降水与NPP的相关性明显强于气温。河西地区的气温与NPP呈正相关的区域主要集中在河西地区中部,包括黑河和疏勒河中下游区域,以及祁连山区,负相关的区域主要分布于武威市部分地区。河西地区的NPP与降水之间存在着显著的正相关关系,主要位于中部和东南部地区,其中,兰州市部分地区的相关性明显增强,负相关的区域零星分布于河西地区的东南少部分区域。

(3) 耕地、草地和未利用地是河西地区最常见的LULC类型。2000—2020年河西地区的耕地、水域和居民建筑用地面积增长,草地和未利用土地的面积有所减少,林地和水域的流转相对保持平衡。耕地和居民建筑用地的转出量远小于转入量,草地的转移面积整体相较于前10 a均出现减小趋势,而未利用土地的转出量则远大于转入量。耕地、林地和草地的植被NPP影响因子以气候变化为主导,未利用土地和居民建筑用地的植被NPP影响因子逐渐以LUCC为主导。

参考文献(References):

[1] Lang M, Kõlli R, Nikopensius M, et al. Assessment of MODIS NPP algorithm-based estimates using soil fertility and forest inventory data in mixed hemiboreal forests[J]. Forestry Studies, 2017, 66(1): 49-64.

[2] 程淑兰, 方华军, 徐梦, 等. 氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8285-8295. [Cheng Shulan, Fang Huajun, Xu Meng, et al. Regulation of plant-soil-microbe interactions to soil organic carbon in natural ecosystems under elevated nitrogen

deposition: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8285-8295.]

[3] 赵苗苗, 刘熠, 杨吉林, 等. 基于HASM的中国植被NPP时空变化特征及其与气候的关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 215-225. [Zhao Miaomiao, Liu Yi, Yang Jilin, et al. Spatio-temporal patterns of NPP and its relations to climate in China based on HASM[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2): 215-225.]

[4] Zhang F G, Zeng B, Cao Y, et al. Human activities have markedly altered the pattern and trend of net primary production in the Ili River basin of northwest China under current climate change[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(14): 2585-2595.

[5] Chen S F, Zhang Q F, Chen Y N, et al. Vegetation change and eco-environmental quality evaluation in the Loess Plateau of China from 2000 to 2020[J]. Remote Sensing, 2023, 15(2): 424.

[6] Chen X J, Mo X G, Hu S, et al. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over north China plain from 2000 to 2014[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27 (6): 661-680.

[7] 凡晚晴, 吴华, 樊风雷. 近20年来西藏地区NPP时空变化及影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 378-386. [Fan Wanqing, Wu Hua, Fan Fenglei. Spatial-temporal variation of net primary productivity and its influencing factors in Tibet over past 20 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 378-386.]

[8] 李飞, 赵军, 赵传燕, 等. 中国西北干旱区潜在植被模拟与动态变化分析[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 42-50. [Li Fei, Zhao Jun, Zhao Chuanyan, et al. Simulating and analyzing dynamic changes of potential vegetation in arid areas of Northwest China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(4): 42-50.]

[9] 周广胜, 王玉辉. 全球变化与气候-植被分类研究和展望[J]. 科学通报, 1999, 44(24): 2587-2593. [Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. Global change and climate-vegetation classification research and perspectives[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (24): 2587-2593.]

[10] 王景升, 张宪洲, 赵玉萍, 等. 藏北羌塘高原气候变化的时空格局[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1852-1859. [Wang Jingsheng, Zhang Xianzhou, Zhao Yuping, et al. Spatio-temporal pattern of climate changes in northern Tibet's Qiangtang Plateau[J]. Resources Science, 2008, 30(12): 1852-1859.]

[11] 薛梅, 陈芸芝, 闫敏, 等. 中国东北地区植被NPP模拟与时空变化分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 821-830. [Xue Mei, Chen Yunzhi, Yan Min, et al. Simulation and spatio-temporal variation analysis of net primary productivity in Northeast China[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 821-830.]

[12] 孔春芳, 岳永财, 徐凯. 2000—2015年江汉平原区域植被NPP时空特征及其对气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1460-1469. [Kong Chunfang, Yue Yongcai, Xu Kai. Spatial-temporal variation of vegetation net primary productivity and its response to climate change in Jianghan Plain from 2000 to 2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1460-1469.]

[13] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608. [Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(5): 603-608.]

[14] 赵晓, 周文佐, 田罗, 等. 土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7658-7668. [Zhao Xiao, Zhou Wenzuo, Tian Luo, et al. Effects of land-use changes on vegetation net primary productivity in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7658-7668.]

[15] 彭月月, 魏妍冰, 李启权, 等. 气候和土地利用变化对成都市植被NPP时空分布的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(11): 150-159. [Peng Yueyue, Wei Yanbing, Li Qiquan, et al. The effects of changes in climate and land use on the spatio temporal distribution of vegetation NPP in Chengdu[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(11): 150-159.]

[16] 蔡小青, 刘凤. 三江源区植被生产力时空格局及其变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(Suppl.): 56-59, 62. [Cai Xiaoqing, Liu Feng. Spatiotemporal pattern and change characteristics of vegetation productivity in the Three River Headwaters[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(Suppl.): 56-59, 62.]

[17] Li J, Cui Y P, Liu J Y, et al. Estimation and analysis of net primary productivity by integrating MODIS remote sensing data with a light use efficiency model[J]. Ecological Modelling, 2013, 252: 3-10.

[18] Zhao L, Yang C H, Zhao Y C, et al. Spatial correlations of land use carbon emissions in Shandong peninsula urban agglomeration: A perspective from city level using remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1488.

[19] 鲁晖, 董敬儒, 贺思嘉, 等. 2000—2017年河西地区山地-绿洲-荒漠系统植被变化趋势与可持续性分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 99-108. [Lu Hui, Dong Jingru, He Sijia, et al. Vegetation change trend and persistence analysis of the mountain-oasis-desert system in Hexi Region from 2000 to 2017 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(1): 99-108.]

[20] 窦睿音, 延军平, 王鹏涛. 全球变化背景下甘肃近半个世纪气温时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 73-79. [Dou Ruiyin, Yan Junping, Wang Pengtao. Spatiotemporal distribution of temperature in Gansu province under global climate change during the period from 1956 to 2012[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 73-79.]

[21] 王旭阳, 常跟应. 1998—2018年河西走廊农业生产地区专业化

时空演变分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 186-194. [Wang Xuyang, Chang Genying. Analysis of the spatio-temporal evolution of regional specialization of agriculture in the Hexi Corridor between 1998 and 2018[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(2): 186-194.]

[22] 戴尔阜, 方创琳. 甘肃河西地区生态问题与生态环境建设[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(2): 1-5. [Dai Erfu, Fang Chuanglin. Ecological problems and eco-environment construction in Hexi corridor Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(2): 1-5.]

[23] 高振荣, 田庆明, 刘晓云, 等. 近58年河西走廊地区气温变化及突变分析[J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 194-203. [Gao Zhenrong, Tian Qingming, Liu Xiaoyun, et al. Characteristics and abrupt change of temperature in the Hexi corridor in recent 58 years[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(2): 194-203.]

[24] 谭淼, 周启刚. 2000—2015年典型山地区域净初级生产力时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 339-346. [Tan Miao, Zhou Qigang. Characteristics of spatial and temporal distribution of net primary productivity in Typical Mountain regions from 2000 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 339-346.]

[25] Gabriel O, Paula P, Daniela F, et al. Remotely sensed primary productivity shows that domestic and native herbivores combined are overgrazing Patagonia[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 56(7): 1575-1584.

[26] 李登科, 王钊. 基于MOD17A3的中国陆地植被NPP变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 397-405. [Li Dengke, Wang Zhao. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(3): 397-405.]

[27] Wang X L, Bao Y H. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 81-87.

[28] Hicke J A, Lobell D B, Asner G P. Cropland area and net primary production computed from 30 years of USDA agricultural harvest data[J]. Earth Interactions, 2004, 8(10): 1-20.

[29] Fu Y C, Lu X Y, Zhao Y, et al. Assessment impacts of weather and land use/land cover (LULC) change on urban vegetation net primary productivity (NPP): A case study in Guangzhou, China[J]. Remote Sensing, 2013, 5(8): 4125-4144.

[30] Yue S, Wang C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J]. Water Resources Research, 2002, 38(6): 1068.

[31] Aditya F, Gusmayanti E, Sudrajat J. Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in west Kalimantan [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 893(1): 9.

[32] 肖桐, 刘纪远, 邵全琴. 近20年青海三江源自然保护区植被生产力变化模拟[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(5): 5557-5565. [Xiao Tong, Liu Jiyuan, Shao Quanqin. A simulation on changes in vegetation productivity in "Three River Sources" Nature Reserve, Qinghai province over past 20 years[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(5): 5557-5565.]

[33] Shi S H, Zhu L P, Luo Z H, et al. Quantitative analysis of the contributions of climatic and anthropogenic factors to the variation in net primary productivity, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 789.

[34] Huang Q, Zhang F Y, Zhang Q, et al. Assessing the effects of human activities on terrestrial net primary productivity of grasslands in typical ecologically fragile areas[J]. Biology, 2022, 12(1): 38.

[35] Yang Y S, Fan X M, Wang X, et al. Net primary productivity changes associated with landslides induced by the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Land Degradation & Development, 2022, 34 (4): 1035-1050.

[36] 王凌阁, 朱睿, 陈泽霞, 等. 甘肃河西地区2000—2019年水土资源耦合协调特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 44-53. [Wang Lingge, Zhu Rui, Chen Zhexia, et al. Coupling effect of water-soil resources in Hexi area of Gansu, China in 2000-2019[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 44-53.]

[37] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英, 等. 甘肃省季节性净初级生产力变化特征[J]. 遥感信息, 2017, 32(5): 102-110. [Liu Chunyu, Dong Xiaofeng, Liu Yingying, et al. Variation characteristics of seasonal net primary productivity in Gansu province[J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(5): 102-110.]

[38] Peng D L, Huang J F, Huete Alfredo R, et al. Spatial and seasonal characterization of net primary productivity and climate variables in southeastern China using MODIS data[J]. Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology), 2010, 11(4): 275-285.

[39] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in east Asia [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 58-66.

[40] 王莉雯, 卫亚星, 牛铮. 净初级生产力遥感估算模型空间尺度转换[J]. 遥感学报, 2010, 14(6): 1074-1089. [Wang Liwen, Wei Yaxing, Niu Zheng. Spatial scaling of net primary productivity model based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(6): 1074-1089.]

[41] Jiang T, Wang X L, Afzal M M, et al. Vegetation productivity and precipitation use efficiency across the Yellow River Basin: Spatial patterns and controls[J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5074.

[42] Zhao L, Chen Y Q, Wang X Y, et al. Spatiotemporal changes in net primary productivity before and after the development of unused land in the hilly areas of Hebei, China[J]. PloS One, 2022, 17(6): e0270010.

[43] 李婷婷, 马超, 郭增长. 2004—2015年贺兰山自然保护区植被NPP时空变化与气候响应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 254-261. [Li Tingting, Ma Chao, Guo Zengzhang. Response of spatio-temporal change of NPP to climate in Helanshan Mountain Nature Reserve from 2004 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 254-261.]

Impacts of climate change and land use/cover change on the net primary productivity of vegetation in Hexi Region, Northwest China

LIU Yidan[1], YAO Xiaojun[1], LI Zongxing[1,2], HU Jiayu[1]

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Alpine Region, Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Hexi Region holds a dual significance in China, being both a pivotal area for ecological security and the core of the Silk Road Economic Belt. The assessment of the net primary productivity (NPP) of the region and a quantitative analysis of the driving forces behind these dynamics bears immense theoretical importance and practical implications. Based on MOD17A3 product, land use cover, and meteorological information, this study scrutinized the evolving characteristics of the vegetation-related NPP, the influence of land use cover changes, and climate fluctuations on the NPP of the Hexi Region from 2000 to 2020. This study employed *R*-contribution rate and biased correlation analysis methods. The results show that: (1) There was an overall increase in the area of arable land, waters, and residential land in the Hexi Region, while the grassland and unused land area was reduced. The overall dynamics of land use cover change (LUCC) after 2010 was significantly higher, with grassland, cropland, built-up land, and unused land dominating the inter-conversion of land use types. (2) The overall NPP in the Hexi Region increased, with rates of change of 0.86 and 1.29 in the periods 2000−2010 and 2010−2020, respectively. There was a significant regional variation in NPP, which decreased from southeast to northwest. (3) The influence of LUCC on NPP gradually increased from 2000 to 2020. While climate change contributed more to NPP than LUCC, their respective roles varied among land use cover types. Specifically, climate change dominated the influence factor of NPP on cropland, forested land, and grassland, whereas for unutilized land and residential construction areas, LUCC played a more significant role.

Keywords: net primary productivity; land use/land cover; spatial and temporal changes; driving factors; Hexi Region